

# Manifestations calorimétriques des mécanismes de fatigue du polyamide 6.6

**A. BENAARBIA<sup>a</sup>, A. CHRYSOCHOOS<sup>a</sup>, G. ROBERT<sup>b</sup>**

- a. Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université Montpellier 2, CNRS,  
Place Eugène Bataillon, 34090 Montpellier  
abenaarb{andre.chrysochoos}@univ-montp2.fr
- b. Solvay Engineering Plastics, Centre de Simulation et Validation des Applications,  
Avenue Ramboz- BP64 – 69192 Saint Fons,  
gilles.robert@solvay.com

## Résumé :

*Dans ce travail, des techniques de mesures de champs ont été utilisées pour étudier les effets énergétiques induits par les mécanismes de localisation se développant au sein d'une matrice de polyamide 6.6 lors d'un essai uniaxial de fatigue cyclique. Une estimation locale des sources de chaleur et du taux d'énergie de déformation a été réalisée. Les résultats montrent des zones de localisation se développant au sein de la partie utile de l'échantillon où les puissances mécanique et dissipée s'intensifient progressivement au cours de l'essai, traduisant ainsi la fatigue du matériau.*

## Abstract:

*In this work, full-field measurement techniques were used to study energy effects induced by localization mechanisms developing in the polyamide 6.6 matrix, during a uniaxial cyclic fatigue test. A local estimate of heat sources and the deformation energy rate was achieved. The results show localization zones within the gaged part of the sample where mechanical and dissipation energy rates intensified gradually during the test, reflecting the material fatigue.*

**Mots clefs : Bilan local de puissance, mesures de champs, localisation, fatigue cyclique**

## 1 Introduction

Une première difficulté liée à l'étude de la fatigue cyclique des matériaux est son observation et, par voie de conséquence, la compréhension des mécanismes irréversibles locaux de déformation aboutissant à la rupture. En effet, les essais de fatigue sont longs et les phénomènes de dégradation restent lents, parfois imperceptibles d'un cycle à l'autre si on se limite aux effets mécaniques.

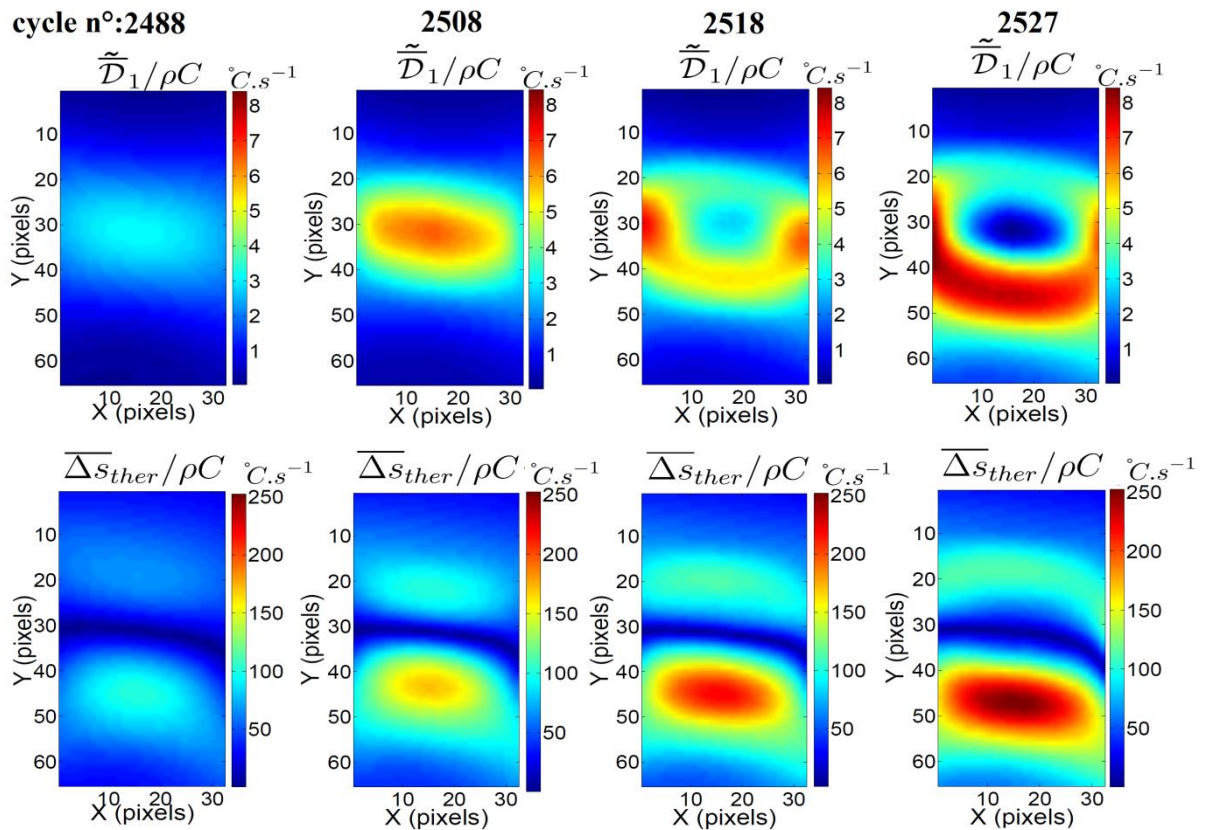
Dans cette étude, on combine les techniques infrarouges et de corrélation d'images de granularité afin d'étudier localement les mécanismes de fatigue au travers des champs de sources de chaleur et de taux d'énergie de déformation. L'objectif ici est de juger du caractère localisé de l'avancement du processus de fatigue, que ce soit au travers de l'évolution du taux d'énergie de déformation mise en

jeu, de la puissance dissipée ou encore au travers des sources thermoélastiques, traduisant, via la thermodilatibilité du matériau, le caractère hétérogène du champ de contrainte. L'objectif consiste donc à repérer très tôt les zones matérielles qui «fatiguent» préférentiellement, d'estimer leur nombre, leur forme et d'observer leur évolution au cours des cycles.

Ce qui suit décrit brièvement les résultats obtenus. Les lecteurs intéressés par la démarche expérimentale développée pour obtenir ces résultats sont invités à consulter [1-2], où une large bibliographie sur les aspects métrologiques, les techniques de traitement d'images et les méthodes d'évaluation des sources de chaleur peut y être trouvée. Le comportement énergétique du PA6.6 est, de plus, fortement sensible à la vitesse de déformation et au taux d'humidité. Là encore des résultats complémentaires pourront être trouvés dans [3-8].

## 2 Caractère hétérogène des essais

Nous observons sur la **Figure 1** les distributions spatiales des champs de la dissipation intrinsèque moyenne par cycle (en haut) et celles de l'amplitude thermoélastique (en bas) lors d'essais de fatigue cycliques de traction-traction uniaxiale menés sur un échantillon sec de la matrice polyamide 6.6. Ces images calorimétriques représentent les derniers cycles devant la rupture de l'échantillon sollicité. Toutes les sources de chaleur sont estimées à partir des champs de température saisis pour chaque cycle de fatigue. Les écarts type et valeurs moyennes associés aux champs calorimétriques sont regroupés dans Tableau 1.



**Figure 1:** Champs de dissipation intrinsèque moyenne par cycle et d'amplitude thermoélastique calculés pendant les tous derniers cycles devant la rupture macroscopique d'une matrice sèche de polyamide 6.6. Même échelle de couleur pour les images de même nature. La résolution spatiale est 0.357 mm/pixel.

Des distributions spatiales hétérogènes apparaissent dans toutes les images sélectionnées. Ces hétérogénéités s'intensifient cycle après cycle. Les zones de localisation dans les champs calorimétriques sont rapidement détectables durant l'essai (i.e. généralement dès les 100 premiers cycles), et deviennent très marquées (i.e. un rapport écart type sur valeur moyenne  $R_{d/m}$  d'au moins 40%). Le premier lot d'images montre un échantillon répondant de façon relativement homogène avec de faibles localisations dans les champs calorimétriques (les 2488 premiers cycles). Puis, ces champs font progressivement apparaître de fortes localisations spatiales ( $R_{d/m} \approx 65\%$  pour la dissipation intrinsèque au cycle 2527, et 58% pour l'étendue de sources thermoélastiques). Ces zones de localisations traversent *in fine* la largeur de l'échantillon. Il doit être aussi noté que les endroits où la dissipation intrinsèque est maximale ne sont pas toujours identiques à ceux où l'étendue des sources thermoélastiques est la plus importante, ces dernières étant insensibles aux effets de cisaillement.

n° cycle	$\tilde{D}_1/\rho C$ ( $^{\circ}C.s^{-1}$ )			$\overline{\Delta s}_{ther}/\rho C$ ( $^{\circ}C.s^{-1}$ )		
	écart type	moyenne	$R_{d/m}$	écart type	moyenne	$R_{d/m}$
<b>2488</b>	0.7	1.41	49%	21.35	52.54	40%
<b>2508</b>	1.23	2.35	52%	36.18	76.57	47%
<b>2518</b>	1.62	2.7	60%	48.02	92.48	52%
<b>2527</b>	2.25	3.41	65%	59.17	101.55	58%

**Tableau 1.** Ecarts type et valeurs moyennes spatiales associés aux champs calorimétriques indiqués à la figure 1.

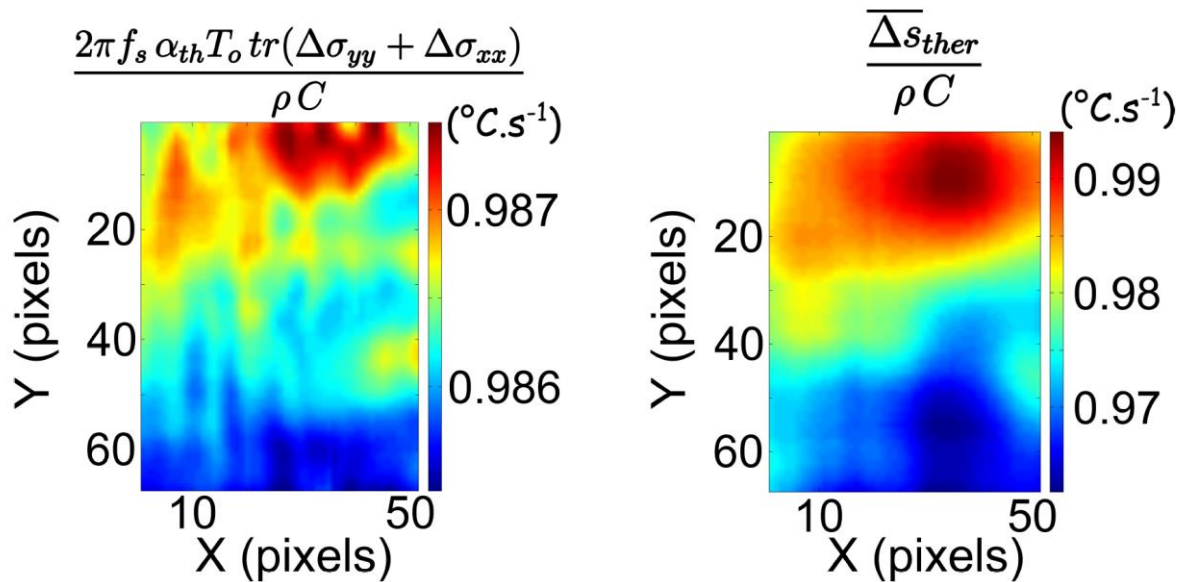
On constate donc que les zones représentant de « fortes » puissances thermoélastiques et de dissipation semblent évoluer très rapidement vers la fin du test. La croissance du rapport écart type/valeur moyenne (cf. **Tableau 1**) peut être interprétée comme un développement progressif des zones où les mécanismes de déformation se développant préférentiellement. A ce stade la partie utile de l'échantillon répond de façon clairement hétérogène.

### 3 Analyse comparative des mesures énergétiques

Une façon de se convaincre que les hétérogénéités des champs énergétiques observées sont bien induites par des réponses matérielles hétérogènes et non (exclusivement) par des erreurs systématiques induites par le traitement (délicat) des images thermiques et cinématiques, consiste à comparer directement les champs énergétiques. Dans ce qui suit, on se propose donc de comparer les zones de localisation en regardant les distributions de grandeurs énergétiques accessibles soit, *via* les mesures de champs cinématiques, soit, *via* les mesures de champs de température. L'idée consiste à comparer la distribution des champs d'étendue de sources thermoélastiques (estimée *via* les données thermiques) avec celle des champs d'étendue de trace des contraintes (cf. **Figure 2**), théoriquement proportionnelle à la source thermoélastique dans le cadre de la thermoélasticité linéaire isotrope [9]. Puis, nous comparerons la distribution des taux moyens d'énergie de déformation par cycle issue des données cinématiques à la dissipation moyenne sur ce même cycle déduite des données thermiques (cf. **Figure 3**). La puissance dissipée ne représentant qu'une partie de l'énergie de déformation, il est fort probable qu'une corrélation, entre les distributions de ces deux grandeurs, existe et soit détectable.

### 3.1 Thermoélasticité linéaire isotrope

La propriété que prévoit la théorie thermoélastique linéaire isotrope est illustrée dans la **Figure 2**, où nous avons représenté la distribution spatiale de l'étendue de la source thermoélastique d'une éprouvette de polyamide 6.6 non renforcée soumise à un essai de traction-traction uniaxiale caractérisé par un rapport de charge de 0.1, une fréquence de chargement de 0.2 Hz et un nombre d'images par cycle de 125 images. Le champ d'amplitude thermoélastique représenté à la **Figure 2** a une valeur moyenne de  $0.96 \text{ } ^\circ\text{C.s}^{-1}$  et un écart type de  $0.017 \text{ } ^\circ\text{C.s}^{-1}$ , et peut être comparé avec celui de la trace des étendues de contrainte. Les observations montrent une proportionnalité entre le champ des traces de contrainte et celui des amplitudes de sources thermoélastiques. Sur la **Figure 2** une zone d'intensité très légèrement plus forte peut être observée dans l'extrémité haute des 2 champs. Nous pouvons conclure que le champ d'amplitude thermoélastique tel qu'il est estimé par la méthode de traitement utilisée est en concordance avec la théorie thermoélastique linéaire isotrope. Reste à confronter maintenant les dissipations locales moyennes par cycle aux taux moyens par cycle d'énergie de déformation.



**Figure 2:** Exemple montrant la proportionnalité de la source thermoélastique à la trace des amplitudes de variation de contrainte.

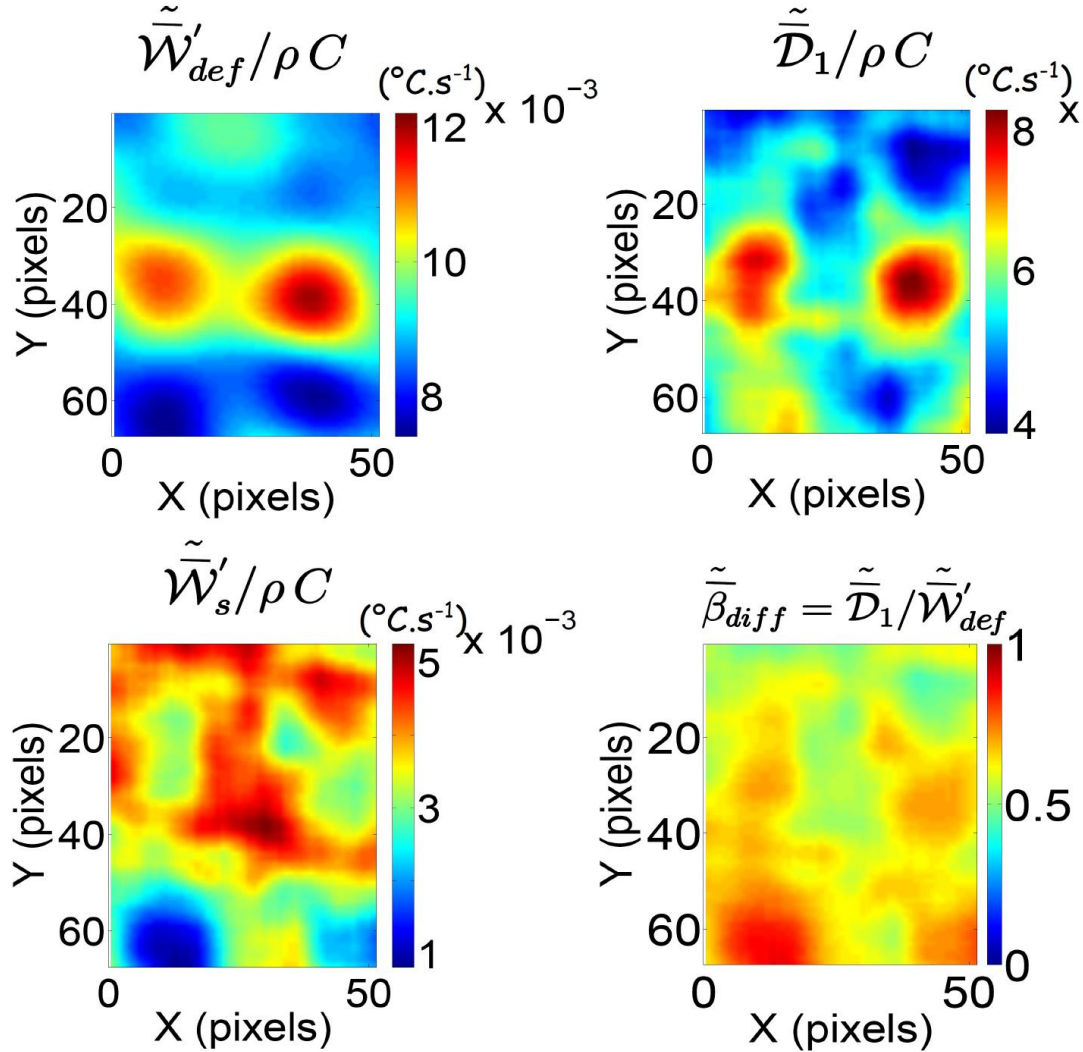
### 3.2 Bilan de puissance local

Nous présentons dans la **Figure 3** les trois champs 2D du taux d'énergie de déformation, dissipée et bloquée moyen sur le dernier cycle de l'essai pris précédemment comme exemple illustratif; ainsi nous avons tracé la proportion  $\tilde{\beta}_{diff}$  (coefficient dit de Taylor et Quinney « différentiel »). Ici, le taux d'énergie de déformation est estimé *via* les champs locaux de contrainte et de vitesse de déformation, tandis que la dissipation intrinsèque moyenne par cycle est calculée à partir du modèle 2D de dissipation.

Dans les 2 champs 2D, 2 zones où les taux d'énergie de déformation et d'énergie dissipée sont plus importants, sont nettement observables. Ce type de résultat, déjà obtenu dans d'autres études en fatigue sur des matériaux métalliques [10], est, disons, rassurant car de façon indépendante et complémentaire, il montre que c'est dans les zones qui « travaillent le plus » (i.e. où la perte d'énergie



de déformation sur un cycle est la plus grande), que la dissipation (i.e. transformation de puissance mécanique en chaleur) moyenne sur ce cycle est la plus grande aussi. Les résultats montrés ici indiquent par ailleurs un rapport  $\tilde{\beta}_{diff}$  entre le taux d'énergie dissipée et celui de l'énergie déformation qui varie de 50% à 90%. Ces chiffres illustrent, d'une autre façon, le niveau d'hétérogénéité constaté au sein de la zone matérielle analysée.



**Figure 3:** Bilan local de puissance montrant le niveau d'hétérogénéité constaté au sein de la zone matérielle analysée.

## 4 Conclusion

Les techniques de mesure des champs ont été utilisées pour mieux appréhender les phénomènes de localisation de sources de chaleur et de déformation. Le premier résultat à mettre en avant est le caractère non homogène de la réponse de la partie utile des éprouvettes. Cette hétérogénéité apparaît dès les premiers cycles, que ce soit sur le plan mécanique (énergie de déformation) ou calorimétrique (énergie dissipée). Notons que les zones présentant des niveaux « faibles » ou « forts » de réponses sont stables au cours de l'essai. Pour se convaincre de l'origine matérielle des hétérogénéités, nous avons comparé des distributions issues des données mécaniques et thermiques comme la distribution de la trace du tenseur des contraintes planes aux sources thermoélastiques et la distribution du taux moyen d'énergie de déformation sur un cycle à la dissipation moyenne. Dans ces deux cas, on retrouve nettement une corrélation entre ces champs comme le laisse prévoir le cadre théorique utilisé. Les

traitements d'image montrent que la partie utile de l'échantillon se comporte très vite comme une structure et pas simplement comme un matériau homogène sollicité de façon uniaxiale. Les zones de localisation se mettent en place rapidement puis s'affirment progressivement tout au long de l'essai, traduisant la fatigue du matériau. L'amplification brutale des niveaux de puissance mise en jeu sur la fin de l'essai annonce la rupture de l'éprouvette tout comme le rapport  $R_{d/m}$  associé aux champs de dissipation.

## Références

- [1] Berthel B. (2007). Mesures thermographiques de champs de dissipation accompagnant la fatigue à grand nombre de cycles des aciers. Thèse de doctorat, Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc.
- [2] Benaarbia A. (2014). Analyse énergétique du comportement thermomécanique du PA6.6 chargé de fibres de verre. Thèse de doctorat, Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc.
- [3] Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. (2014). Kinetics of stored and dissipated energies associated with cyclic loadings of dry polyamide 6.6 specimens. *Polymer Testing*, **34**: 155-167.
- [4] Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. (2014). Influence of relative humidity and loading frequency on the PA6.6 thermomechanical cyclic behavior: Part I: Mechanical and thermal aspects. *Polymer Testing*, **40**: 290 – 298.
- [5] Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. (2014). Influence of relative humidity and loading frequency on the PA6.6 thermomechanical cyclic behavior: Part II: Energy aspects. *Polymer Testing*, **41**: 92 – 98.
- [6] Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. (2015). Fiber orientation effects on heat source distribution in reinforced polyamide 6.6 subjected to low cycle fatigue. *Journal of Engineering Mathematics*, **90**: 13 – 36. Special issue - Journal guest-editors: R. Ogden, K. Soldatos and J. Merodio.
- [7] Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. (2015). Thermomechanical behavior of PA6.6 composites subjected to low cycle fatigue. *Composites Part B: Engineering*, **76**: 52 – 64.
- [8] Benaarbia A., Chrysochoos A., Robert G. (2015). Sottos N., Rowlands R. Dannemann K. (Eds). Influence of Relative Humidity on the Thermomechanical Behavior of PA6.6. *Experimental and Applied Mechanics*, volume 6, Springer International Publishing, 167 – 176.
- [9] Thomson W. (1857). On the thermo-elastic and thermo-magnetic properties of matter. Part i. Quarterly Journal of Mathematics. Pages : 57 – 77.
- [10] Chrysochoos A., Berthel B., Latourte F., Galtier A., Pagano S. Wattrisse B. (2008). Local energy analysis of high cycle fatigue using digital image correlation and infrared thermography. *Journal of Strain Analysis*, **43** : 411 – 421.